



EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM, BUDAPEST

# Kommunikációs hálózatok forgalommodellezése

VADERNA PÉTER

DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Fizika doktori iskola

Vezetője: Dr. Horváth Zsolt

Statisztikus Fizika, Biológiai Fizika és

Kvantumrendszerek fizikája program

Vezetője: Dr. Kürti Jenő

Támavezető: Dr. Vattay Gábor, az MTA doktora, egyetemi tanár

Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Budapest

2008

## 1. Bevezetés

A vonalkapcsolt technológiára épülő, elsősorban hanghívásokat továbbító hagyományos telefonhálózatok forgalmának statisztikai leírása és modellezése megoldott probléma volt a XX. század elején. Ez a kérdéskör újra előkerült az 1970-es években a csomagkapcsolt technológián alapuló számítógéphálózatok és az Internet elterjedésével. A hálózat méretének és a forgalom komplexitásának növekedésével egyre több olyan jelenségről számoltak be, melyekre a korábbi leírás nem volt alkalmazható. Ilyen jelenség pl. a hálózat egy adott pontján mért forgalom (egységnyi idő alatt átmenő adatmennyiség byte/s-ban mérve) statisztikus önhasonlósága és az időben mért hosszútávú korrelációi, a nagy fluktuációk az aktív periódusok hosszában, hatványfüggvény szerinti teljesítmény spektrum a végpontok közti csomag késleltetés idősorában stb. Hasonló jelenségek előfordulnak fizikai és biológiai rendszerekben ugyanúgy, mint szociális és pénzügyi rendszerekben. Ezen komplex rendszerek kollektív viselkedésének vizsgálatához a statisztikus fizika eszköztára nyújthat segítséget.

A hálózat belsejében levő útvonalválasztó elemek (ún. routerek) bizonyos sebességgel képesek továbbítani a bejövő csomagokat. Ha az időegység alatt érkező csomagok száma nagyobb, mint amennyit a router ki tud küldeni, akkor azok egy puffertben tárolódnak és később kerülnek kiszolgálásra. Ha a túlterhelés tartósan jelentkezik, akkor nagy csomag késleltetés és csomagvesztés fordulhat elő. A routerek (elsősorban a központi routerek) tervezésénél és méretezésénél az egyik legnagyobb kihívás, hogy az érkezési intenzitás nagy ingadozása és önhasonlósága miatt a sorhosszstatisztikák nehezen számolhatók, ráadásul a hagyományos modellek jelentősen alulbecslik a valódi sorhosszt.

Olyan modellekre volt tehát szükség, amelyek figyelembe veszik az adatforgalomra jellemző alapvető tulajdonságokat, például a hálózati protokollok (Transmission Control Protocol/Internet Protocol, TCP/IP) működését, és számot adnak a forgalom mennyiségének nagy ingadozásáról, vagyis arról a jelenségről, hogy hosszú ideig tartó üres szakaszt hirtelen sok, sűrűn egymás után következő csomag érkezése követ ("burst" jellegű érkezések), és az eloszlások lassú lecsengéséről, ugyanakkor megbecsülhetők vagy analitikusan számolhatók a rendszer viselkedését leíró paraméterek.

Bár a korábban használt Poisson és Erlang statisztika csak bizonyos korláton belül alkalmas a számítógéphálózatok forgalmának modellezésére, ezeknek az általánosításaival, az ún. mátrix-analitikus módszerekkel bizonyos tartományon jó közelítést kaphatunk. A dolgozat célja a hálózati forgalom leírása és modellezése. A használt eszközök olyan általánosított Markov modellek, melyek le tudják írni a lassan lecsengő változókat is egy adott skálatartományon. Az első két téziscsoport a TCP dinamikai leírásával foglalkozik. A harmadik és negyedik téziscsoport a mátrix-analitikus függvények alkalmazását mutatja be egy sorbanállási problémán keresztül, illetve optimalizálja azok mátrix reprezentációját.

## 2. Célkitűzések

A kutatómunka egyik legfontosabb feladata a hálózat forgalmának viselkedését meghatározó folyamatok megértése volt, illetve azon alapvető szabályok, protokollok meghatározása, melyek jelentős mértékben hozzájárulnak a csomag-szintű mérésekben tapasztalt jelenségekhez. További célom volt a hálózat belső működési szabályainak felhasználásával olyan modellt alkotása, melynek segítségével kiszámolhatók a forgalmat leíró legfontosabb paraméterek.

A modellben használt Markov-lánc megközelítés alkalmazhatósága a távközlésben fontos kérdés. A mátrix-analitikus módszerek elmélete olyan keretet ad, melynek segítségével széles skálatartományon modellezhetők a csomagszintű folyamatok. Végtelen kiszolgálós sorbanállási rendszerekben a sorhossz statisztika általános esetben nem számolható ki egzaktul. A kérdés az volt, hogy szűkítve az esetet mátrix-analitikus függvényekre (Markov érkezési folyamatok és fázis típusú eloszlások alkalmazásával), megoldható-e a probléma. A mátrix-analitikus módszerek közvetlenül alkalmazhatók távközlési problémák megoldására, konkrét jelentést tulajdonítva az alapul szolgáló Markov-lánc állapotainak és átmeneteinek. Előfordulhat azonban, hogy az állapotszám olyan mértékben megnövekszik, hogy a feladat numerikusan kezelhetetlen lesz. Ezért az állapotok számának (vagyis a reprezentáció méretének) redukálására egy olyan elméleti megközelítést szerettem volna alkalmazni, melynek segítségével világosan láthatóvá válik egy adott mátrix-analitikus függvény reprezentációjának és ezzel az alkalmazhatóságának bonyolultsága.

### 3. Alkalmazott módszerek

Munkám során a sztochasztikus folyamatok elméletéből ismert Markov-lánc fogalmát és alapvető tételeit használtam, emellett szükség volt a sorbanállási rendszerek elméletének ismeretére is. Ezeket a TCP/IP protokollcsalád és az ezeket használó hálózati elemek működési mechanizmusának ismeretében alkalmaztam kommunikációs hálózatokban megjelenő véletlenszerű jelenségek vizsgálatára.

A mátrix-analitikus módszerek elmélete egy olyan kiterjesztése a Markov modellnek, amellyel a folyamatoknak egy bővebb osztálya modellezhető. A leíró függvények reprezentálhatók beágyazott Markov-lánccokkal, mátrixokkal, de leképezhetők véges dimenziós valós vektortérben értelmezett poliéderekre is. Az analízis során a mátrix-aritmetika és a differenciál-geometria alaptételeit használtam, továbbá szükség volt a közönséges elsőrendű inhomogén lineáris differenciálegyenlet rendszerek megoldásának ismeretére is.

A konkrét hálózati konfigurációkat egy a szakirodalomban gyakran hivatkozott, ismert szimulátor eszközzel valósítottam meg.

### 4. Az értekezés tézisei

1. A dolgozatban megmutattam, hogy a torlódás természetes módon terjed az adatforgalomhoz képest ellenkező irányban. Megállapítottam, hogy a TCP dinamikai tulajdonságai hozzájárulnak a torlódási hullámok kialakulásához és stabilitásához. Megmutattam, hogy a küldési sebességben fellépő nagy ingadozások ("burst"-ök) nagy szerepet játszanak a jelenség kialakulásában. A mechanizmus lényege, hogy a "burst" küldés miatt várhatóan az a TCP forrás szenved csomagvesztést, mely a leginkább túlterhelt routeren keresztül csatlakozik. A többi TCP forrás közben növeli a küldési sebességet, aminek következtében a csomagok küldési irányával ellentétes irányban jelenik meg újra a torlódás. A jelenséget szimulációval vizsgáltam, ahol megállapítható volt, hogy a "burst" hatás csökkentésével a torlódási hullám megszűnik.

2. Két modellt hoztam létre, melyben rövid (pl. Web alkalmazásokban megjelenő) TCP letöltések idejét, sebességét és a hálózatra gyakorolt hatását vizsgáltam. Az első modellben egy olyan rendszert jellemeztem, ahol több párhuzamos TCP kapcsolat ugyanazon a vonalon osztozik. A TCP tranzienis viselkedése alapján a vonal kihasználtságára adtam egy képletet a párhuzamos TCP kapcsolatok számának függvényében. Ez a képlet alapjául szolgál egy olyan Markov modellnek, mely a párhuzamos TCP kapcsolatok számának dinamikáját írja le, ennek a Markov modellnek egy közelített változata alapján ismert módszerekkel számolhatók a forgalom lényeges teljesítmény jellemzői. Az eredményt szimulációs eredmények támasztják alá. A második modellben olyan Web-oldal letöltéseket vizsgáltam, ahol az oldalon levő objektumok egymás után töltődnek le. A teljesítmény mutatókat (átlagos letöltési sebesség, átlagos letöltési idő) két esetben számoltam ki: 1) amikor a TCP kapcsolatok egymás után nyílnak és záródnak; 2) amikor az egész oldal egyetlen nagy objektumként töltődik le ("pipelining" algoritmus). Explicit összefüggést állapítottam meg a fenti esetben számolt átlagos letöltési sebességek között, a képlet érvényességét szimulációval és valós hálózati mérésekkel is alátámasztottam, továbbá szimulációs vizsgálatokkal kimutattam, hogy a fájlméreteloszlás nem befolyásolja jelentősen a fenti modellt.
3. Egy olyan sorbanállási rendszert vizsgáltam, ahol az érkezés Markov érkezési folyamat szerint, a kiszolgálás általános eloszlás szerint történik és végtelen számú kiszolgáló van a rendszerben. A cél a sorhossz momentumok időbeli változásának meghatározása volt. Erre a problémára közelítő megoldás korábban már ismert volt. Megmutattam, hogy a momentumokra vonatkozó egyenletek egzaktul is megoldhatók, ha szűkítjük a problémát arra az esetre, amikor fázis típusú eloszlás szerint történik a kiszolgálás. Demonstráltam, hogyan használható a megoldás közvetlenül olyan hálózati alkalmazások tervezésénél, ahol több párhuzamos kiszolgáló működik egyszerre.
4. Olyan függvényeket vizsgáltam, melyek három exponenciális függvény összegeként állnak elő, valószínűségi sűrűségfüggvényt írnak le és az expo-

nensben szereplő paraméterek páronként különböző valós számok (vagyis a Laplace traszformáltjának három különböző valós pólusa van). Ez a mátrix-analitikus függvényeknek egy speciális esete. Kidolgoztam egy leképezést, mely a vizsgált függvényosztály elemeit és azok bizonyos transzformációit megfelelően képezi le a kétdimenziós síkra. A szakirodalomban ismert invariáns poliéderes elméletet és differenciál-geometriai megközelítést használva egy rekurzív eljárást mutattam be, mellyel a síkon megtalálható az egy-, két- illetve háromdimenziós mátrixokkal reprezentálható függvények halmaza. Ezek a halmazok a síkon adott invariáns poliédereknek felelnek meg. A módszer alkalmazható több dimenziós mátrixokkal reprezentálható függvények azonosítására is, ezek azonban már nem poliéderek, hanem paraméteres görbékkel határolt konvex halmazok a síkon. Továbbá megfogalmaztam egy tételt, mely jelentős lépést tesz a módszer általánosítása felé  $n$  különböző valós pólusra. Végül bemutattam egy egyszerű eljárást arra, hogyan lehet egy adott poliéderre konkrét reprezentációt számolni.

## 5. Következtetések

- A TCP protokoll torlódásvédelmi algoritmus és a csomagok érkezési intenzitásában fellépő nagy ingadozások együttesen a torlódás állapotának továbbterjedését indukálják a hálózatban bizonyos körülmények között, ahol a torlódási hullám terjedésének iránya ellentétes a csomagok irányával.
- Egy olyan végtelen kiszolgálóval rendelkező sorbanállási rendszer sorhosszmomentumai, ahol az érkezési és kiszolgálási folyamat is mátrix-analitikus függvénnyel adott, egzaktul megkaphatók. Kihasználva a mátrix-analitikus függvények konstrukcióját és mátrix-reprezentációját, a megoldás közvetlenül alkalmazható távközlési rendszerek modellezésére és tervezésére.
- A mátrix-analitikus eloszlásoknak egy csoportját (melyek Laplace-transzformáltjának három különböző valós pólusa van) kétdimenziós valós vektortérbe képezve ezen eloszlások osztályozhatók bonyolultság szerint és megállapítható egy adott eloszlás minimális felső-háromszög reprezentációja.

## A tézisek alapjául szolgáló publikációk

### Folyóirat cikkek és könyvfejezetek

- [J1] J. Stéger, P. Vadera and G. Vattay, "On the Propagation of Congestion Waves in the Internet," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 359, 784-792, January 2006.
- [J2] P. Vadera and T. Éltető, "Transient Analysis of a Queuing System with Matrix-Geometric Methods," *Lecture Notes in Computer Science, Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking* Vol. 4003/2006, 21-33, 2006.
- [J3] T. Éltető and P. Vadera, "Időben változó sorbanállási rendszer vizsgálata mátrix-geometrikus eljárások segítségével," *Híradástechnika* 2005/11, 38-44, 2005.
- [J4] T. Éltető and P. Vadera, "Finding upper-triangular representations for Phase-type distributions with 3 distinct real poles," *Annals of Operations Research* 160/1, 139-172, April, 2008.

### Konferencia cikkek

- [C1] T. Éltető, P. Vadera and S. Molnár, "Performance Analysis of TCP Networks Loaded by Web Traffic," *18th International Teletraffic Congress, (ITC18)*, (Berlin, Germany), 2003.
- [C2] P. Vadera, E. Strömberg and T. Éltető, "Modelling Performance of HTTP/1.1," *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2003)*, (San Francisco, CA), 2003.

## Egyéb publikációk

- [O1] J. Stéger, P. Vaderna and G. Vattay, "On the Propagation of Congestion Waves in the Internet ," *The European Conference of Complex Systems, (ECCS'05)*, pid-128, (Paris, France), 2005.
- [O2] P. Vaderna and T. Éltető, "Transient Analysis of a Queuing System with Matrix-Geometric Methods," *NEW2AN 2006*, LNCS 4003, 21-33, (Saint-Petersburg), 2006.
- [O3] T. Éltető and P. Vaderna, "Finding upper-triangular representations for Phase-type distributions with 3 distinct real poles," *MAM6* (Beijing), 2008.
- [O4] D. Krupp, G. Pongrácz and P. Vaderna, "Regulation method of load on telecommunication network node e.g. media gateway, involves regulating load of slave node using preset leaky bucket restrictor and determining round-trip response delay of messages sent from master node," Patent Application WO-2008/ 043398-A1, 2008.